

# Estudio de la absorción estacional del hierro en cítricos, mediante la técnica de dilución isotópica

El presente trabajo evaluó la respuesta de la distribución estacional de una dosis de hierro en plantas jóvenes de cítricos mediante la incorporación de un quelato marcado con el isótopo estable  $^{57}\text{Fe}$  al sistema planta-suelo. La dosis de 240 mg de Fe se distribuyó desde el inicio de la actividad vegetativa (principios de marzo) hasta el completo desarrollo del fruto (final de octubre), realizándose los mayores aportes en los meses de verano. Las plantas marcadas con el  $^{57}\text{Fe}$  se extrajeron del suelo, en diferentes momentos fenológicos (final de la floración, final de caída fisiológica de los frutos, crecimiento y maduración del fruto). Se cuantificó la eficiencia de absorción del Fe suministrado y su distribución entre los diferentes órganos durante el ciclo, así como la contribución del Fe absorbido del fertilizante al desarrollo de nuevos tejidos

PALABRAS CLAVE: absorción, cítricos, fertilización, hierro, quelatos,  $^{57}\text{Fe}$ .

M.R. Martínez-Cuenca<sup>1</sup>, A. Quiñones<sup>2</sup>, B. Martínez-Alcántara<sup>1</sup>, F. Legaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Citricultura y Producción Vegetal. IVIA. Moncada (Valencia).

<sup>2</sup>Centro para el Desarrollo de Agricultura Sostenible. IVIA. Moncada (Valencia).

## INTRODUCCIÓN

El hierro (Fe) es un elemento indispensable para el metabolismo de los vegetales, ya que interviene en procesos metabólicos fundamentales para el desarrollo de las plantas. La deficiencia de Fe (clorosis férrica) es uno de los principales estreses abióticos en los cítricos y frutales del área mediterránea. Esta deficiencia reduce la longevidad de la plantación y afecta al desarrollo de las nuevas brotaciones, como consecuencia de la escasa translocación de este elemento desde las hojas adultas a los nuevos tejidos. Por tanto, las brotaciones vegetativas son progresivamente menos vigorosas y sus hojas más pequeñas. En estas condiciones suele producirse una defoliación anticipada de los brotes, que provoca la muerte de los mismos en un proceso progresivo que comienza en la zona apical, conocido con el nombre de "seca de ramillas". En los niveles de deficiencia aguda, se reduce la producción y la calidad, los maduros suelen ser de menor tamaño, con la piel suave y falta de color. Es característico que el flavedo de las naranjas y mandarinas adquiera un color amarillento, sin alcanzar las tonalidades anaranjadas-rojizas de los frutos

normales y disminuye el contenido de sólidos solubles del zumo.

Aunque la mayor parte de los suelos contienen cantidades considerables de hierro para satisfacer las necesidades de los cultivos, la precipitación de este ion en forma de hidróxido férrico insoluble provoca serios problemas de clorosis férrica debido a su escasa asimilabilidad para las plantas. La presencia de oxígeno, los medios alcalinos y el exceso de humedad del suelo, favorecen la precipitación del Fe. En los suelos alcalinos, predominantes en la cuenca mediterránea, los altos niveles del ion bicarbonato son la causa principal de la clorosis férrica en plantaciones de cítricos. Los análisis foliares realizados en un estudio llevado a cabo sobre 400 parcelas (grupos Navel, Clementina y Satsuma) en la Comunidad Valenciana revelaron que un 15% de los campos presentaban un estado deficiente o bajo en Fe, el 82% se encontraban en un estado óptimo y un 3% mostró un nivel alto de este elemento (Legaz *et al.*, 1995).

Por otro lado el Fe en la planta, apenas se remobiliza de las hojas viejas a los tejidos jóvenes en desarrollo, ya que el Fe se transporta desde las

raíces hasta la parte aérea vía xilema, unido al ión citrato. Pero, una vez fijado en los órganos aéreos permanece inmóvil debido a su retención en los ácidos orgánicos (citrato y malato, principalmente) del tejido parenquimático foliar. Así, las hojas acumulan Fe a medida que van envejeciendo, y apenas se producen remobilizaciones hacia las nuevas brotaciones. Estudios previos confirman la inapreciable movilidad de este nutriente entre los tejidos de las hojas en cítricos (Legaz *et al.*, 1994), sin embargo, no se tiene información de su translocación desde los órganos leñosos (ramas, tronco y sistema radical).

La forma más efectiva de corregir esta deficiencia es mediante quelatos de Fe. Legaz *et al.* (2008) recomiendan aplicar en plantaciones adultas de 0 a 17 Kg/ha de quelato de EDDHA (6% Fe) para valores foliares de Fe en el estado nutritivo normal (61 a 100 ppm Fe); de 19 a 32 en el bajo (35 a 60 ppm Fe) y la dosis de 34 Kg/ha para el estado muy bajo (<35 ppm Fe). Sin embargo, cabe destacar que la prevención y corrección de esta carencia representa un 15% del coste total de la fertilización (Fernández-Zamudio, 2016).



Son varios los factores implicados en la absorción del Fe; además de los intrínsecos a la planta (vigor de la variedad y del patrón, edad del arbolado), los correspondientes al medio de cultivo, dosis de Fe y su época de aplicación (distribución estacional) y el fraccionamiento (número de aplicaciones). En cuanto a la época de aplicación de los nutrientes, se sabe que éstos son absorbidos por los cítricos durante todo el año, si bien la absorción no es constante a lo largo del ciclo. En otros nutrientes, la época de máxima absorción abarca el final de la primavera, verano y principio de otoño y la de mínima durante el invierno (diciembre, enero y febrero). En este contexto es por tanto evidente el interés de profundizar en el conocimiento de la dinámica del hierro en la planta con el fin de establecer los criterios del abonado de este nutriente y optimizar su aplicación estacional, limitando de este modo el aporte de cantidades excesivas de fertilizantes férricos, lo que supondrá un ahorro en los costes de producción.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la distribución estacional de una dosis de hierro sobre los siguientes aspectos: a) cuantificación de la absorción de Fe a lo largo del ciclo vegetativo y su eficiencia de uso, b) distribución del Fe absorbido procedente del fertilizante entre los distintos órganos de la planta en distintos momentos fenológicos, c) contribución relativa del Fe absorbido del fertilizante a la fructificación, así como al desarrollo vegetativo de las distintas brotaciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en 20 plantas de la variedad Clementina de Nules (*Citrus clementina* Hort ex Tan),

inertadas sobre citrange Carrizo (*Citrus sinensis* x *Poncirus trifoliata*), de 3 años al inicio del ensayo. Las plantas se cultivaron en la estación experimental del IVIA en contenedores individuales de 46 L de capacidad con 65 Kg de un suelo típico del cultivo de los cítricos del este peninsular (franco: 45 arena, 36 limo y 19% arcilla) con 27% de  $\text{CaCO}_3$  y pH 8,3. La fertilidad del suelo en materia orgánica y P era óptima, y alta en K y Mg. Los árboles se protegieron de las inclemencias climáticas con un techo transparente de policarbonato.

La dosis de Fe aportada fue 240 mg por planta, de acuerdo con el criterio de Legaz *et al.* (2008) para plantas jóvenes de mandarina (diámetro de copa 60 cm) en riego por goteo. Con el fin de determinar con precisión el destino del Fe aplicado, se recurrió a la técnica de dilución isotópica. Esta técnica consiste en la adición al sistema de un fertilizante que contiene un isótopo estable del Fe ( $^{57}\text{Fe}$ ), de escasa presencia en los sistemas naturales, y que por tanto actúa de trazador del Fe aplicado. En este ensayo la dosis se aportó con un quelato líquido (1 mg Fe /mL) marcado al 94% con el isótopo  $^{57}\text{Fe}$  ( $^{57}\text{Fe}$ -o-o-EDDHA), desde el inicio de la actividad vegetativa (principio de marzo) hasta el completo desarrollo del fruto (final de octubre).

Dado que apenas existe información sobre la distribución estacional del Fe en cítricos, el quelato se incorporó quincenalmente en la solución de fertirriego siguiendo una distribución paralela a la realizada para el N, en la que los máximos aportes se realizan en los meses de verano (Legaz y Primo-Millo 2000; Legaz *et al.*, 2008) en este cultivo (Tabla 1).

La aplicación del resto de macronutrientes y micronutrientes se realizó siguiendo las recomendaciones de Quiñones *et al.* (2007) y Legaz *et al.* (2008).

En 5 momentos fenológicos del ciclo vegetativo se arrancaron del suelo 4 plantas marcadas con  $^{57}\text{Fe}$ : final de la floración (15 de mayo), final del cuajado y final de la caída de frutos (1 de julio), en dos momentos de crecimiento del fruto (25 de agosto y 15 de octubre) y en completa madurez del fruto (10 de diciembre). En la parte aérea se separaron los órganos jóvenes pertenecientes a las brotaciones del ciclo en curso (flores/frutos, ramas y hojas de las brotaciones de primavera, verano y otoño) y órganos viejos (hojas del año anterior, ramas y tronco). El sistema radical se extrajo cuidadosamente del suelo recuperando, de forma manual, todas las raicillas que pudieran quedar en el suelo y se separó en raíces gruesas y fibrosas (<2 mm). Se cuantificó el peso fresco de los diferentes órganos y se tomó una muestra representativa de cada uno. Las muestras se desecaron en estufa, determinando su peso seco y posteriormente fueron trituradas.

La concentración de Fe total se determinó mediante un espectrómetro de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (iCAP 6000, Thermo Scientific). La abundancia de  $^{57}\text{Fe}$  se determinó por espectrometría de masas de alta resolución de relaciones isotópicas de colector múltiple (MC-ICP MS, Thermo Finnigan Neptune).

**Tabla 1.** Dosis de Fe y distribución de las diferentes formas de Fe contenidas en el quelato.

	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Total
Distribución (%)	5	10	15	20	20	15	10	5	100
Fe (mg planta <sup>-1</sup> ) <sup>z</sup>	12,0	24,0	36,0	48,0	48,0	36,0	24,0	12,0	240,0
$^{57}\text{Fe}$ (mg planta <sup>-1</sup> ) <sup>y</sup>	11,28	22,56	33,84	44,12	44,14	33,84	22,56	11,28	220,60
Fe no marcado (mg planta <sup>-1</sup> ) <sup>x</sup>	0,72	1,44	2,16	2,88	2,88	2,16	1,44	0,72	14,40

<sup>z</sup>: Total de Fe aplicado por planta.

<sup>y</sup>: El 94 % de la dosis procede del quelato que incorpora el isótopo estable. Este  $^{57}\text{Fe}$  es la base del cálculo de los parámetros básicos de este estudio.

<sup>x</sup>: El 6,0 % de la dosis procede de Fe no marcado.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Tabla 2** se presentan los valores de biomasa de cada órgano, así como el total de la planta. Los árboles duplicaron su peso en el ciclo estudiado, produciéndose los principales incrementos en biomasa durante el desarrollo de la segunda y tercera brotación, que tienen lugar entre mayo y julio, y julio y octubre, respectivamente. Estos valores son similares a los encontrados en la bibliografía para árboles jóvenes (Martínez *et al.*, 2002; Menino *et al.*, 2007; Alva *et al.* 2003).

La concentración de Fe de las hojas está estrechamente relacionada con su edad, de modo que los mayores valores se dieron en las hojas viejas y los más bajos en las hojas de la brotación de otoño, de menor edad (**Tabla 3**). Además, también se dieron pautas opuestas en la concentración a lo largo del ciclo entre ambos tipos de hojas y en los demás órganos; mientras que en las viejas decreció de forma irregular, en las hojas jóvenes de las distintas brotaciones (primavera, verano y otoño) la concentración aumentó progresivamente. En cambio, en los órganos jóvenes reproductivos (flores y frutos) decreció de forma muy pronunciada, como consecuencia del efecto de dilución de este elemento, asociado al incremento de biomasa de los frutos en crecimiento. Los órganos viejos (ramas y tronco) mantuvieron valores estables, con una tendencia ligeramente decreciente a lo largo del ciclo. Las raíces gruesas y, sobre todo, las fibrosas mostraron concentraciones más elevadas que los órganos de la parte aérea. Éstas mantuvieron una tendencia creciente desde floración hasta el final del cuajado del fruto (julio) y después los valores decrecieron de forma considerable hasta el final del ciclo.

En la **Figura 1** se exponen los valores del Fe absorbido del fertilizante (Fe<sub>adf</sub>) correspondiente a los periodos analizados (comprendidos entre las extracciones sucesivas de plantas) a lo largo del ciclo. Este parámetro cuantifica el Fe que absorben las plantas en esos periodos que procede

**Tabla 2.** Peso seco o biomasa (g) de las plantas y los distintos órganos en las extracciones realizadas en diferentes momentos fenológicos.

Órganos/Planta <sup>z</sup>	Floración (15 may)	Cuajado fruto (1 jul)	Desarrollo fruto (25 ago)	Desarrollo fruto (15 oct)	fruto maduro (10 dic)
Flores/Frutos	6,8 ± 3,6	5,3 ± 3,7	8,5 ± 0,8	26,0 ± 4,0	60,2 ± 7,0
Hojas otoño				54,2 ± 41,7	56,0 ± 34,7
Hojas verano		71,6 ± 35,4	88,9 ± 76,3	91,3 ± 37,3	92,4 ± 32,4
Hojas primavera	84,4 ± 17,3	95,9 ± 16,7	93,1 ± 12,2	115,1 ± 17,6	125,5 ± 17,3
Ramas otoño				12,4 ± 2,8	14,2 ± 6,9
Ramas verano		9,6 ± 3,9	15,7 ± 14,2	23,3 ± 12,1	22,8 ± 5,7
Ramas primavera	13,6 ± 1,8	17,8 ± 2,1	24,9 ± 3,7	25,1 ± 1,6	27,0 ± 4,0
Hojas viejas	115,7 ± 19,5	110,0 ± 13,1	96,3 ± 14,6	87,4 ± 17,2	79,8 ± 6,9
Ramas viejas	122,8 ± 18,5	152,4 ± 23,9	177,7 ± 34,1	186,3 ± 7,7	200,4 ± 8,7
Tronco	124,8 ± 14,5	156,7 ± 14,4	175,8 ± 4,3	210,4 ± 37,9	220,5 ± 64,1
Raíces gruesas	194,7 ± 30,0	200,6 ± 14,5	219,8 ± 11,3	270,6 ± 48,8	289,2 ± 33,9
Raíces fibrosas	84,5 ± 9,4	109,8 ± 14,1	149,6 ± 16,3	164,1 ± 23,1	185,3 ± 26,5
Planta	747,4 ± 38,5	929,7 ± 43,1	1.050,3 ± 125,9	1.266,2 ± 85,8	1.363,3 ± 48,2

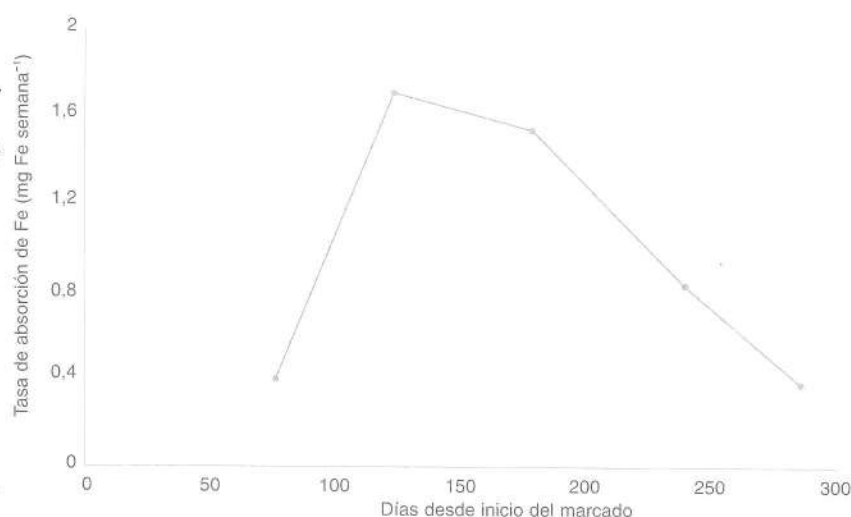
<sup>z</sup>: Cada valor es la media de 4 órganos o plantas ± desviación estándar.

**Tabla 3.** Concentración de Fe (mg Fe/1000 g, peso seco) de los distintos órganos y concentración ponderada de Fe en las extracciones realizadas en diferentes momentos fenológicos.

Órganos/Planta <sup>z</sup>	Floración (15 may)	Cuajado fruto (1 jul)	Desarrollo fruto (25 ago)	Desarrollo fruto (15 oct)	fruto maduro (10 dic)
Flores/Frutos	52 ± 3	36 ± 2	16 ± 4	13 ± 0	11 ± 1
Hojas otoño				27 ± 6	31 ± 2
Hojas verano		34 ± 2	37 ± 2	40 ± 6	41 ± 9
Hojas primavera	34 ± 5	36 ± 3	39 ± 2	41 ± 6	42 ± 7
Ramas otoño				26 ± 5	24 ± 0
Ramas verano		27 ± 4	30 ± 0	31 ± 8	32 ± 2
Ramas primavera	29 ± 3	36 ± 4	39 ± 4	39 ± 6	39 ± 8
Hojas viejas	59 ± 4	45 ± 4	50 ± 6	48 ± 9	49 ± 2
Ramas viejas	37 ± 3	34 ± 5	36 ± 2	36 ± 5	34 ± 4
Tronco	45 ± 6	41 ± 5	38 ± 2	38 ± 7	37 ± 3
Raíces gruesas	171 ± 13	223 ± 34	209 ± 30	173 ± 24	163 ± 29
Raíces fibrosas	2.391 ± 193	2.877 ± 188	2.406 ± 195	2.350 ± 242	2.118 ± 153
Planta <sup>y</sup>	342 ± 38	413 ± 39	411 ± 27	366 ± 26	342 ± 37

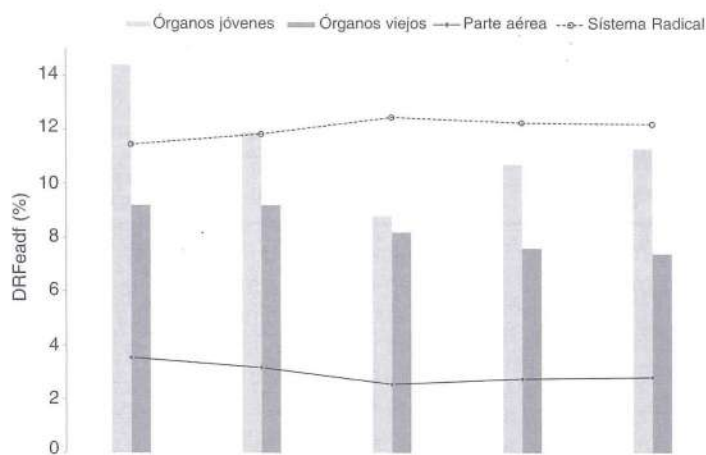
<sup>z</sup>: Cada valor es la media de 4 órganos o plantas ± desviación estándar.

<sup>y</sup>: (mg Fe/1000 g, peso seco) planta =  $\Sigma$  contenido Fe (mg) planta  $\times$  1000 /  $\Sigma$  peso seco (g) planta.



**Figura 1.** Tasa de absorción estacional del hierro a lo largo del ciclo de cultivo.



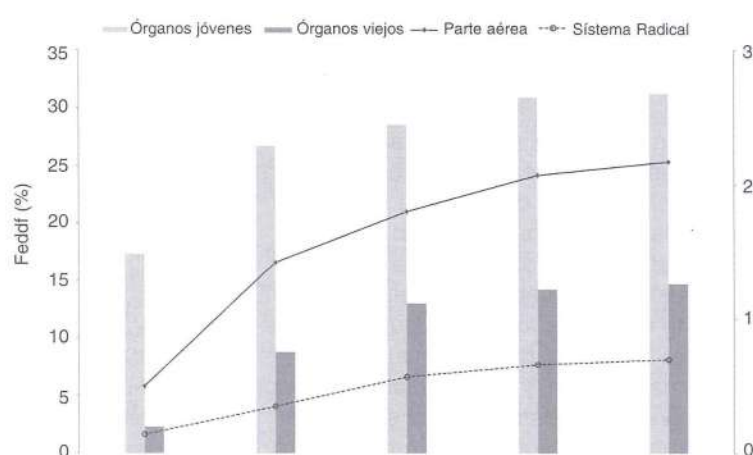


**Figura 2.** Distribución relativa del hierro absorbido del fertilizante en los distintos órganos de la planta (eje de la izquierda: valores órganos jóvenes y órganos viejos; eje de la derecha: parte aérea y sistema radicular).

del quelato aportado. En el periodo comprendido entre el inicio de la actividad vegetativa (principio de marzo) y el final de la floración (mitad de mayo) las plantas absorbieron unos 0,40 mg de Fe por semana. La tasa de absorción aumentó algo más de 4 veces durante el cuajado y final de caída de frutos y se mantuvo similar durante la fase de crecimiento rápido del fruto. En el periodo siguiente que finalizó con la extracción de las plantas el 15 de octubre, la absorción se redujo a la mitad y en la última época, que corresponde al proceso de maduración del fruto, la tasa de absorción fue ligeramente inferior a la presentada en la primera época.

El sistema radical acumuló aproximadamente el 80% del Fe absorbido del fertilizante, mientras que los órganos de la parte aérea acumularon el 20% del Fe procedente del quelato en todas las extracciones realizadas a lo largo del ciclo (**Figura 2**). Esta pauta contrasta con la distribución del nitrógeno absorbido del fertilizante, que se acumula en un 60-75% en la parte aérea (Legaz y Primo-Millo, 1988; Weinert *et al.* 2002). Este resultado evidencia que ambos nutrientes se distribuyen de forma completamente diferente entre los órganos de la parte aérea y el sistema radical.

La DRFeadf entre los órganos de la parte aérea varió en función del momento de la extracción. De modo que en floración y cuajado de los frutos los órganos jóvenes acumularon, de forma relativa al total absorbido,



**Figura 3.** Porcentajes de hierro derivado del fertilizante en los distintos órganos de la planta (eje de la izquierda: valores órganos jóvenes y órganos viejos; eje de la derecha: parte aérea y sistema radicular).

**Tabla 4.** Fe derivado del fertilizante (Feddf) en los distintos órganos y de las plantas arrancadas en los principales momentos fenológicos.

Órganos/Planta <sup>2</sup>	Floración (15 may)	Cuajado fruto (1 jul)	Desarrollo fruto (25 ago)	Desarrollo fruto (15 oct)	fruto maduro (10 dic)
Flores/Frutos	13,8 ± 8,2	21,4 ± 5,1	26,4 ± 5,7	28,7 ± 3,6	19,6 ± 4,6
Hojas otoño				34,4 ± 3,6	35,0 ± 2,1
Hojas verano		31,2 ± 3,6	31,9 ± 2,4	32,7 ± 5,6	34,4 ± 5,5
Hojas primavera	18,3 ± 4,4	25,6 ± 4,1	28,1 ± 5,9	31,4 ± 5,0	32,4 ± 2,8
Ramas otoño				27,6 ± 4,3	28,0 ± 4,3
Ramas verano		25,6 ± 1,4	26,2 ± 3,8	26,3 ± 3,5	26,4 ± 3,4
Ramas primavera	13,1 ± 2,9	16,7 ± 2,9	20,0 ± 3,4	21,3 ± 3,9	21,8 ± 4,2
Hojas viejas	1,9 ± 0,3	7,1 ± 2,7	9,4 ± 2,6	10,9 ± 1,7	11,3 ± 3,6
Ramas viejas	3,3 ± 0,7	12,5 ± 1,3	17,0 ± 2,0	17,2 ± 2,8	17,6 ± 3,8
Tronco	2,1 ± 0,1	7,2 ± 1,4	11,7 ± 1,0	13,4 ± 2,6	13,9 ± 3,5
Raíces gruesas	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	2,7 ± 0,4	3,4 ± 0,9	3,7 ± 0,9
Raíces fibrosas	1,5 ± 0,3	3,8 ± 0,6	6,1 ± 1,1	7,0 ± 0,8	7,4 ± 2,4
Planta <sup>3</sup>	1,7 ± 0,2	4,1 ± 0,5	6,5 ± 1,1	7,5 ± 0,7	8,0 ± 1,9

<sup>2</sup>: Cada valor es la media de 4 órganos o plantas ± desviación estándar.

<sup>3</sup>: Feddf (%) órgano o planta =  $\frac{{}^{57}\text{Fe}(\%) \text{ órgano o planta} \times 100}{91,80}(\%)$   ${}^{57}\text{Fe}$  en el fertilizante aplicado).

más Fe del fertilizante que los viejos; en cambio, al principio de agosto, el Fe absorbido del fertilizante se repartió casi por igual entre el conjunto de ambos grupos de órganos. A partir de este momento y hasta el final del ciclo decreció de forma progresiva en los viejos y en los jóvenes mantuvo una tendencia opuesta, debido al desarrollo de la tercera brotación y al crecimiento final del fruto.

En la **Tabla 4** se exponen los porcentajes de hierro derivado del fertilizante (Feddf) de cada órgano y del conjunto de la planta con respecto a sus contenidos totales en Fe. El Feddf cuantifica la contribución relativa del Fe procedente del fertilizante al total de este elemento en el órgano. Es por tanto un indicador de en qué proporción las

necesidades en Fe del órgano en cuestión, o del total de la planta, son satisfechas por el Fe procedente del fertilizante aplicado. Un valor bajo de este parámetro conllevaría a un incremento en las proporciones aportadas por el Fe procedente de otras fuentes: las reservas de la propia planta y el disponible en el suelo.

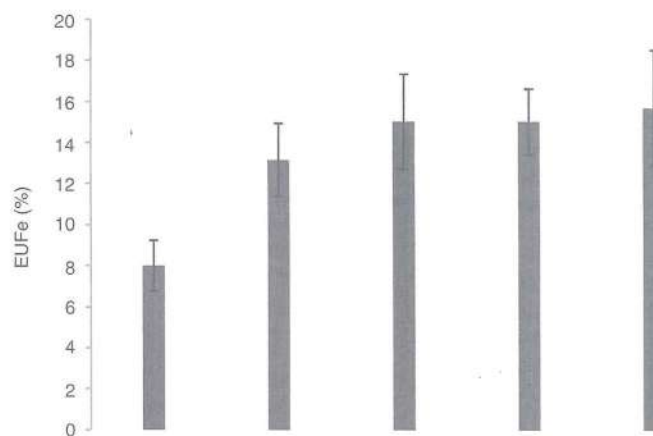
A lo largo de las sucesivas extracciones, la contribución del Fe procedente del fertilizante al contenido del Fe de la planta incrementó considerablemente, como consecuencia del aporte estacional continuo. En floración, los valores no alcanzaron el 2% del contenido total de Fe de la planta; mientras que en la madurez del fruto, el Fe procedente del fertilizante supuso el 8% del Fe presente en la planta.



En todas las extracciones realizadas, los valores del Feddf en los órganos jóvenes (flores, frutos y hojas de las brotaciones en desarrollo) fueron notablemente superiores al de los órganos viejos (**Figura 3**); pero conforme avanzó el ciclo, las diferencias entre los valores de ambos órganos se redujeron considerablemente, de modo que en floración el valor del Feddf de los órganos jóvenes superó en más de 7 veces el valor de los órganos viejos y, al final del ciclo, la proporción del Feaddf en los jóvenes apenas duplicó la proporción de los viejos. Esto refleja que en las primeras fases del ciclo vegetativo, el Fe suministrado con el fertilizante abastece, preferentemente, a los órganos jóvenes que actúan como sumideros. Pero a pesar de esta pauta, cabría destacar la baja contribución neta del Fe aplicado al desarrollo de las flores y cuajado de los frutos, ya que sólo el 13,8 y 21,4%, respectivamente, de sus contenidos en Fe procedió del aplicado con el fertilizante y el resto de Fe presente en el órgano procedió del almacenado en las reservas de los órganos viejos leñosos y del disponible en el suelo.

La eficiencia de uso de un nutriente indica la proporción en que el elemento aplicado como fertilizante es absorbido por la planta (sólo puede cuantificarse con el uso de isótopos); sin embargo, su interpretación debe realizarse con cautela, al tratarse de un valor relativo (se calcula como el cociente entre el nutriente absorbido por la planta y la dosis aportada); ya que una eficiencia baja no siempre es debido a una baja capacidad de absorción del árbol, sino que puede ser consecuencia de que la dosis aportada sobrepase las necesidades del cultivo.

La eficiencia de uso del Fe aplicado (EUF<sub>Fe</sub>) en el conjunto de la planta (**Figura 4**) mostró un notable aumento desde la mitad de mayo hasta primeros de julio y posteriormente, se mantuvo constante y apenas sobrepasó el valor del 15%. Cabe destacar que este valor es muy bajo, el motivo de la baja eficiencia puede deberse a dos causas, que la dosis de Fe aplicada sobrepase en mucho las



**Figura 4.** Eficiencia de uso del Fe aplicado (EUF<sub>Fe</sub>) de las plantas arrancadas en diferentes momentos fenológicos.

necesidades en Fe de las plantas del ensayo; esto no parece evidente, ya que según la **Tabla 1**, la dosis aplicada se ajusta a la demanda en Fe del cultivo del ensayo o que al tener el suelo mucho Fe asimilable, se origine una considerable dilución del <sup>57</sup>Fe aportado, de modo que las plantas absorban una mayor proporción del Fe disponible en el suelo que del aportado con el quelato.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio de la absorción estacional de hierro en plantas jóvenes de cítricos, se extraen las conclusiones siguientes:

- En la mayor parte de los estadios analizados, las mayores concentraciones de Fe se alcanzaron en las raíces, encontrándose el 90 % del total del Fe en la planta en el sistema radicular.
- El Fe aplicado en los estadios tempranos contribuye en menor proporción al desarrollo de nuevos tejidos que el procedente del suelo y las reservas de la planta. Por lo tanto, no se recomiendan aportes excesivos en floración y cuajado de los frutos.
- Las mayores tasas de la absorción estacional de Fe aplicado se alcanzaron en los periodos de crecimiento del fruto (principio de julio hasta el final de agosto), siendo estos los

momentos en los que se debe de realizar los mayores aportes.

- El <sup>57</sup>Fe aplicado se concentró mayoritariamente en los órganos jóvenes de la parte aérea que actuaron como sumidero del mismo; a pesar de ello, entre estos órganos y los viejos sólo acumularon en torno al 20% del Fe total absorbido por la planta y el resto hasta el 100 % se retuvo en el conjunto de raíces. Siendo, el sistema radicular por tanto el principal destino del Fe absorbido del fertilizante.

De esta información se sugiere que la distribución mensual de Fe en los cítricos se debe realizar siguiendo de forma paralela a la curva de absorción estacional de este estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se financió en parte por INIA con el proyecto de investigación (RTA04-064). Se agradece la colaboración prestada en las fases iniciales de este estudio a Ubaldo Chi Bacab, becario de la Fundación Pablo García, Gobierno de Campeche (Méjico). Al Equipo de Investigación de Juan-José Lucena, Universidad Autónoma de Madrid por el asesoramiento en la elaboración del quelato marcado isotópicamente. A Jorge Milló de la Universidad de Vigo. Así como por la asistencia técnica prestada por M. Carmen Prieto, Josefina Giner, M. Teresa Estellés y Ramón Pardo.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alva A.K., Fares A., Dou H.** 2003. Managing citrus trees to optimize dry mass and nutrient partitioning. *J. Plant Nutr.*, 26(8):1541-1559.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.** 1998. Crop evapotranspiration (gridlines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage. Paper N° 56, FAO, Rome.
- Bañuls J., Quiñones A., Primo-Millo E., Legaz F.** 2003a. Aplicación del quelato Fe-EDHHA mediante riego por goteo en mandarina Fortune. *Todo Citrus*, 21: 5-16.
- Bañuls J., Quiñones A., Martín B., Primo-Millo E., Legaz F.** 2003b. Effects of the frequency of iron chelate supply by fertigation on iron chlorosis in Citrus. *Journal of Plant Nutrition*, 26: 10-11.
- Boutton T.W.** 1991. Stable carbon isotopes ratios of natural materials. I. Sample preparation and mass spectrometric analysis. p. 155-171. In D.C. Coleman and B. Fry (eds.). Carbon isotopes techniques. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Brown J.C.** 1966. Iron and Ca uptake as related to root-sap and stem-exudate citrate in soybeans. *Physiol Plant*, 19: 968-976.
- Castel J. R.** 2003. Water use of developing Citrus canopies in Valencia, Spain. Proc. Int. Soc. Citriculture., IX International Citrus Congress. Diciembre, 2000. Orlando, (Florida), 1: 22-226.
- Davies D.D.** 1973. Control of and by pH. *Symp Soc Exp Biol.*, 27: 513-529.
- Feigenbaum S., Bieloral H., Erner Y., Dasberg S.** 1987. The fate of <sup>15</sup>N labelled nitrogen applied to mature citrus trees. *Plant Soil*, 97:179-187.
- Fernández-Zamudio M.A.** 2016. Importancia de los costes fijos y de oportunidad en la rentabilidad de las explotaciones agrícolas. *Levante Agrícola*, 433:212-221.
- Generalitat Valenciana.** 2015. Conselleria de Agricultura, Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Rural. [www.agroambient.gva.es/informes/sector-agrario-valenciano](http://www.agroambient.gva.es/informes/sector-agrario-valenciano) (acceso: 28 septiembre de 2016).
- Golomb, A., Goldschmidt, E.E.** 1980. The mineral balance in the biannual bearing mandarin Wilking. *Alon Hanotea*, 35: 639-648.
- Kubota S., Fukui H., Motoyama E.** 1974b. Effects of the period of intensive application of nitrogen on growth and chemical composition of unfructified Satsuma mandarin trees. Part 1. On growth, absorption of nitrogen and composition of carbohydrates. *Bull. Shikoku Agric. Exp. Stn.*, 28: 107-131.
- Legaz F., Primo-Millo E.** 1988. Absorption and distribution of Nitrogen-15 applied to young orange trees. In: Goren R and Mendel K (eds). Proceedings of the International Society of Citriculture, 2: 643-661. 6th International Citrus Congress, Tel Aviv, Israel.
- Legaz F., Primo-Millo E.** 1984. Influence of flowering, summer and autumn flushes on the absorption and distribution of nitrogen compounds in citrus. In: Proceedings of the International Society of Citriculture, 1: 224-233. 5th International Citrus Congress, Sao Paulo, Brasil.
- Legaz F., Primo-Millo E.** 2000. Criterios para la fertilización de los cítricos en riego localizado por goteo. En: Phytoma-España, S.L. (ed.) Curso de Ferrirrigación de Cítricos. Universitat Politècnica València. Conselleria d'Agricultura, Peixca i Alimentació, 1:137-155.
- Legaz F., Serna M.D., Primo-Millo E.** 1995. La deficiencia de hierro en los cítricos. Servicio de Transferencia de Tecnología Agraria. Conselleria d'Agricultura, Pesca i Alimentació. Generalitat Valenciana, 19 pp.
- Legaz F., Quiñones A., Martínez-Alcántara B., Primo-Millo E.** 2008. Fertilización de los cítricos en riego a goteo II: Mg y microelementos. *Levante Agrícola*, 390: 8-12.
- Legaz F., Serna M.D., Primo-Millo E., Martín B.** 1994. Soil and leaf applications of Fe-chelates to 'Navelina' orange trees. Proc. Int. Soc. Citriculture, 2:613-617. VII International Citrus Congress. Marzo, 1992. Acireale, Sicilia (Italia).
- Legaz F., Primo-Millo E., Primo-Yúfera E., Gil C.** 1981. Dynamics of <sup>15</sup>N-labelled nitrogen nutrition in Valencia orange trees. In: Matsumoto K, Oogaki C and Kozaki I (eds) Proceedings of the International Society of Citriculture, 2: 575-582. 4th International Citrus Congress, Tokio, Japan.
- Legaz F., Primo-Millo E., Primo-Yúfera E., Gil C., Rubio L.** 1982. Nitrogen fertilization in citrus. Absorption and distribution of nitrogen in calamondin trees (*Citrus mitis* B1.), during flowering, fruit set and initial fruit development periods. *Plant Soil*, 66 (3): 339-351.
- López-Millán A.F., Morales F., Abadía A., Abadía J.** 2000. Effects of iron deficiency on the composition of the leaf apoplastic fluid and xylem sap in sugar beet: implications for iron and carbon transport. *Plant Physiol*, 124: 873-884.
- Martínez J.M., Bañuls J., Quiñones A., Martín B., Primo-Millo E., Legaz F.** 2002. Fate and transformation of <sup>15</sup>N labelled applied in spring to Citrus trees. *J. Hortic. Sci. Biotech.*, 77(3): 361-367.
- Martínez-Alcántara B., Quiñones A., Legaz F., Primo-Millo E.** 2012. Nitrogen-use efficiency of young citrus trees as influenced by the timing of fertilizer application. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 175 (2): 282-292.
- Mateo M.A., Ferrio P., Araus J.L.** 2004. Isótopos estables en ecofisiología vegetal. La Ecofisiología Vegetal. Una ciencia de síntesis. Reigosa M.J., Pedrol N. y Sánchez-Moreiras A. eds. Paraninfo S.A. pp 113-160.
- Menino M.R., Carranca C., de Varennes A.** 2007. Distribution and remobilization of nitrogen in young non-bearing orange trees grown under mediterranean conditions. *J. Plant Nutr.*, 30: 1083-1096.
- Nadir M.** 1974. Repartition et taux des éléments minéraux dans les différents organes et parties des citrus in production. Proc. 1st. Int. Citrus Congr., 1973 : Murcia and Valencia, Spain, 1:193-205.
- Powelson D.S., Barraclough D.** 1993. Mineralization and assimilation in soil-plant systems. p. 209-242. In R. Knowles and T.H. Blackburn (eds.). Nitrogen isotopes techniques. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Quiñones A., Bañuls E., Primo-Millo E., Legaz F.** 2005. Recovery of the <sup>15</sup>N-labelled fertiliser in citrus trees in relation with timing of application and irrigation system. *Plant Soil*, 268: 367-376.
- Quiñones A., Martínez-Alcántara B., Primo-Millo E., Legaz F.** 2007. Fertilización de los cítricos en riego a goteo (I): N, P y K. *Levante Agrícola*, 389: 380-385.
- Rabotti G., de Nisi P., Zocchi G.** 1995. Metabolic implications in the biochemical responses to iron deficiency in cucumber (*Cucumis sativus* L.) roots. *Plant Physiol*, 107: 1195-1199.
- Serna M.D., Legaz F., Martín B., Muñoz N., Primo-Millo E., García-Mina J.M.** 1997. Efectividad de diferentes micronutrientes aplicados en riego localizado por goteo en clementina de Nules. Actas de Horticultura (SECH), 20: 544-553. I Congreso Ibérico y III Nacional de Ferrirrigación. Mayo, 1997. Murcia.
- Weinert T.L., Thompson T.L., White S.A., Maurer M.A.** 2002. Nitrogen fertigation on young Navel oranges: growth, N status and uptake of fertilizer N. *HortScience*, 119: 24-31.
- Welkie G.W., Miller G.W.** 1993. Plant iron uptake physiology by nonsiderophore systems. In Barton LL, Hemming BC, eds, Iron Chelation in Plants and Soil Microorganisms. Academic Press, San Diego, 345-369.
- Weyer S., Schwieters J.B.** 2003. High precision Fe isotope measurement with high mass resolution MC-ICPMS. *Int. J. Spectrom.*, 226:355-368.
- Witty J., Ritz K.** 1984. Slow-Release <sup>15</sup>N fertilizer formulations to measure N<sub>2</sub>-fixation by isotope dilution. *Soil Biol. Biochem.*, 16: 657-661.